



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



(11) Numéro de publication: 0 422 990 A1

(12)

DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

(21) Numéro de dépôt: 90402736.4

(51) Int. Cl.s: H01L 31/052, H01L 31/101,
H01L 29/14, H01L 29/76

(22) Date de dépôt: 03.10.90

(30) Priorité: 12.10.89 FR 8913326

(43) Date de publication de la demande:
17.04.91 Bulletin 91/16

(84) Etats contractants désignés:
DE GB

(71) Demandeur: THOMSON-CSF
51, Esplanade du Général de Gaulle
F-92800 Puteaux(FR)

(72) Inventeur: Rosencher, Emmanuel
THOMSON-CSF SCPI Cédex 67
F-92045 Paris la Défense(FR)
Inventeur: Vinter, Borge
THOMSON-CSF SCPI Cédex 67
F-92045 Paris la Défense(FR)
Inventeur: Bois, Paul
THOMSON-CSF SCPI Cédex 67
F-92045 Paris la Défense(FR)

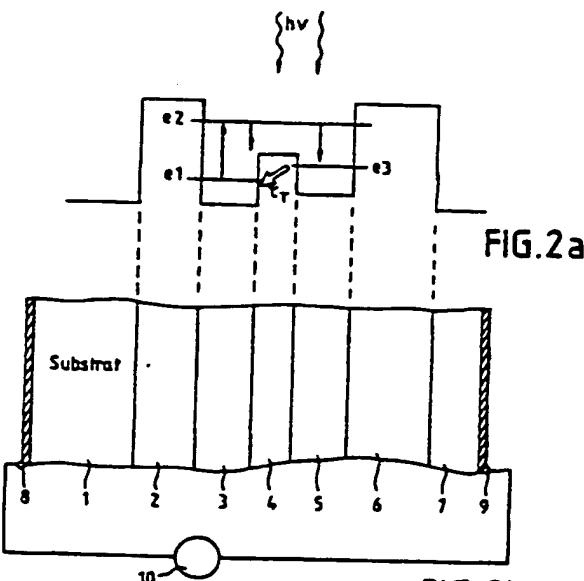
(74) Mandataire: Guérin, Michel et al
THOMSON-CSF SCPI
F-92045 PARIS LA DEFENSE CEDEX 67(FR)

(54) Détecteur capacitif d'onde électromagnétique.

(57) Détecteur capacitif d'onde électromagnétique à puits quantique comportant trois niveaux électroniques e1, e2, e3, et dans lequel une barrière interne (couche 4) interdit un couplage fort entre les niveaux e1 et e3:

Lors d'une irradiation les électrons sont excités du niveau e1 au niveau e2. Les électrons relaxent ensuite vers le niveau e3 jusqu'à ce qu'ils relaxent par effet tunnel vers le niveau e1. Lors de la transition du niveau e1 vers le niveau e3, il y a création d'un dipôle qui est détectable par mesure d'une différence de potentiel aux bornes du dispositif par un détecteur 10.

APPLICATIONS : Détection d'ondes électromagnétiques



DETECTEUR CAPACITIF D'ONDE ELECTROMAGNETIQUE

L'invention concerne un détecteur d'onde électromagnétique et plus particulièrement un détecteur d'onde à semiconducteurs à trous quantiques.

On connaît des dispositifs de détection de rayonnements comportant au moins un puits quantique à composition asymétrique constitué d'un empilement de couches de matériaux de bandes interdites différentes.

C'est ainsi que la demande de brevet français numéro 88 15956 déposée le 6 décembre 1988 décrit une structure destinée à la détection photo-capacitive et au traitement de rayonnements optiques. Cette structure est constituée de trous quantiques asymétriques tels que représentés en figure 1a. Lors d'une illumination, les électrons sont excités d'un niveau électronique e1 à un niveau électronique e2, les deux niveaux n'ayant pas le même barycentre. Cette transition induit un dipôle qui peut être détecté aux bornes d'une capacité formée de tels trous quantiques. D'autres effets non linéaires sont associés (doublement de fréquence, effets électro-optiques) qui peuvent être utilisés dans des modulateurs, etc ... De tels effets ont été confirmés expérimentalement (voir Electronics Letters, vol 25, n° 16 du 3 août 89, page 1063 "Second harmonic generation by intersub-band transitions in compositionnally asymmetrical MQWs" de E. ROSENCHER et al).

L'invention concerne une structure renforçant tous ces derniers différents effets. Afin de mieux mettre en évidence l'objet de l'invention, revenons sur la structure de la figure 1. Sous éclairage, le taux de génération du niveau électronique e1 au niveau électronique e2 est (figure 1) :

$$G_{12} = B_{12} (n_1 - n_2) \phi$$

- ϕ est le flux de photons,

- n_1 et n_2 sont les populations sur les niveaux e1 et e2

- B_{12} le coefficient d'émission induite dit coefficient d'EINSTEIN.

La recombinaison est donnée par :

$$R = n_2 / \tau$$

où τ est le temps de relaxation du niveau e2 vers le niveau e1. La polarisation induite par l'éclairage est :

$$P = n_2 q f_z$$

soit

$$P = q f_z \tau_{12} B_{12} (n_1 - n_2) \phi$$

où :

- f_z est le déplacement moyen du gaz électronique

- q est la charge de l'électron

on a donc $n_2 = \tau B_{12} (n_1 - n_2) \phi$

Il est clair qu'en augmentant la durée de vie τ on augmente le dipôle induit.

On connaît aussi un dispositif présentant un

diagramme de la bande de conduction tel que décrit dans le brevet US 4 745 452 représenté par la figure 1b.

Ce dispositif comporte un puits quantique constitué par deux trous quantiques couplés QWA et QWB. Deux niveaux électroniques permis e_A et e_B sont inférieurs une barrière intermédiaire BA. Cependant un fort couplage existe entre les niveaux e_A et e_B en raison notamment de la faible épaisseur de la barrière intermédiaire BA (épaisseur inférieure à 20 nm par exemple). La détection se fait alors par :

- la transition optique e_A vers e_B
- et donc par la mesure de la variation de conductance de la structure due aux différences de mobilité d'électrons dans chaque puits.

Un tel dispositif est limité à la détection des ondes électromagnétiques inférieures à quelques TeraHz, soit quelques meV.

L'invention vise un dispositif fonctionnant avec des ondes atteignant 30 à 100 TeraHz soit environ 100 meV.

L'invention concerne un détecteur permettant de résoudre ce problème.

L'invention concerne donc un détecteur capacitif d'onde électromagnétique caractérisé en ce qu'il comprend :

a) une structure semiconductrice possédant au moins un empilement d'une première, deuxième, troisième, quatrième, cinquième, sixième et septième couches dont les largeurs des bandes interdites permettent d'obtenir le profil suivant d'énergie potentielle correspondant au bas de la bande de conduction pour les électrons :

- énergie la plus basse pour la troisième couche

;

- énergies intermédiaires pour les quatrième et cinquième avec une énergie supérieure pour la quatrième couche par rapport à l'énergie de la cinquième couche, la quatrième couche constituant une barrière interne ;

- énergies de valeurs supérieures pour les deuxième et sixième couches constituant les barrières du puits ;

ladite structure est telle que l'énergie correspondant à un premier niveau électronique permis étant inférieure à l'énergie potentielle du bas de la bande de conduction du matériau de la quatrième couche, l'énergie correspondant à un deuxième niveau électronique étant comprise entre l'énergie potentielle du bas de la bande de conduction du matériau de la quatrième couche et les énergies potentielles du bas de la bande de conduction des matériaux des deuxième et sixième couches, l'énergie correspondant à un

troisième niveau électronique étant comprise entre l'énergie potentielle du bas de la bande de conduction du matériau de la quatrième couche et celle de la cinquième couche, ce troisième niveau électronique étant supérieur au premier niveau électronique ;

- 5 b) des moyens de peuplement en électrons du premier niveau électronique permis ;
- c) des moyens de détection d'un champ électrique connectés aux première et septième couches.

L'énergie potentielle du bas de la bande de conduction du matériau de la quatrième couche et l'épaisseur de cette quatrième couche interdit un couplage électronique fort entre le premier niveau permis e1 et le troisième niveau e3.

L'invention concerne également un dispositif de détection, caractérisé en ce que la différence des niveaux d'énergie des premier et deuxième niveaux correspond sensiblement à l'énergie des photons à détecter.

L'invention concerne un détecteur capacitif d'onde électromagnétique, caractérisé en ce que les largeurs de bandes interdites des deuxième et sixième couches sont sensiblement équivalentes.

Selon l'invention, la première couche ou la septième couche au moins est dopée de type n+.

La troisième couche est dopée de type n+.

L'invention concerne un détecteur capacitif d'onde électromagnétique, caractérisé en ce qu'il comporte au moins un premier empilement de couches comportant au moins la deuxième, troisième, quatrième, et cinquième couches déposé sur la première couche et, disposé sur le premier empilements, une succession d'empilement de couches comportant chacun des couches identiques au premier empilement puis une sixième couche barrière et une septième couche de contact.

L'invention concerne un détecteur d'onde électromagnétique, caractérisé en ce que les moyens de détection d'un champ électrique comporte des électrodes en contact avec les surfaces extérieures des première et septième couches.

Les différents objets et caractéristiques de l'invention apparaîtront plus clairement dans la description qui va suivre faite à titre d'exemple en se reportant aux figures annexées qui représentent :

- les figures 1a et 1b des diagrammes d'énergies de dispositifs connus dans la technique et décrits précédemment ;
- les figures 2a et 2b, un exempl de réalisation général du dispositif de l'invention ;
- les figures 3 et 4, un exempl de réalisation détaillé de l'invention ;
- la figure 5, un autre exempl de réalisation de l'invention ;
- la figure 6, un exempl d'intégration d'un dispositif selon l'invention avec un transistor à effet

de champ ;

- la figure 7, un exemple numérique du dispositif selon l'invention.

L'objet de l'invention concerne un dispositif comportant deux niveaux électroniques liés e1 et e2 et un troisième niveau électronique e3 de grande durée de vie lié au deuxième niveau e2 mais faiblement couplé au premier niveau e1.

En se reportant aux figures 2a et 2b on va décrire un exemple de réalisation d'un tel dispositif. Ce dispositif comporte un empilement de couches 1 à 7 qui va être décrit ci-après notamment en se référant au diagramme d'énergie correspondant à la bande de conduction (figure 2a).

Les différentes couches sont en matériaux tels que la structure de la figure 2b se présente sous la forme d'un puits quantique asymétrique dont les couches 2 et 6 constituent les barrières.

L'énergie potentielle du bas de la bande de conduction de la couche 3 est la plus basse et sert de référence d'énergie dans la description qui va suivre.

L'énergie potentielle du bas de la bande de conduction de la couche 4 est plus élevée que celle de la couche 5 et celle de la couche 3.

L'énergie potentielle du bas de la bande de conduction de la couche 5 est inférieure à celle de la couche 4 et supérieure ou égale à celle de la couche 3.

Les couches 2 et 6 constituant les barrières du puits quantique présentent des bas de bandes de conduction relativement élevés.

La couche 1, qui tient lieu de substrat selon l'exemple de réalisation représenté, et la couche 7, présentent des bas de bande de conduction relativement faibles.

Ces couches 1 et 7 sont fortement dopées de type n.

Cependant dans d'autres formes de réalisation non représentées, une seule couche 1 ou 7 est fortement dopée de type n.

Selon les figures 2a et 2b, la structure active constituée par les couches 2 à 6 est dopée de type n de telle manière que la majorité des électrons soient localisés dans les couches la plus profonde du puits (niveau e1). Par exemple, la couche 3 est dopée de type n.

Les surfaces extérieures des couches 1 et 7 comportent des électrodes 8 et 9 de contact permettant de connecter un dispositif de test de champ électrique, tel que 10, permettant de détecter un champ électrique dans la structure.

La structure des figures 2a et 2b se présente sous la forme d'un puits quantique possédant une barrière intime (couche 4). Elle comporte :

- un premier niveau électronique permis e1 situé entr le bas de la bande de conduction de la couche 3 et le bas de la bande de conduction de la

couche 4 ;

- un deuxième niveau électronique e2 compris entre le bas de la bande de conduction de la couche 4 et le bas de la bande de conduction des barrières 2 et 6 ;
- enfin, un troisième niveau électronique e3 compris entre le bas de la bande de conduction de la couche 5 et le bas de la bande de conduction de la couche 4, et supérieur au premier niveau d'énergie e1.

La différence des niveaux d'énergie e1 et e2 correspond à l'énergie photonique $\hbar\nu$ d'un rayonnement à détecter. Ainsi, sous l'effet d'un rayonnement électromagnétique de la fréquence ν , des électrons du niveau e1 vont être excités et vont passer sur le niveau e2. Après un temps de relaxation, ces électrons vont retourner pour une partie sur le niveau e1 et pour une autre partie vont aller peupler le niveau e3.

Le transfert de charges sur le niveau e3 crée un dipôle et donne lieu à un champ électrique détectable aux bornes du dispositif. Les charges du niveau e3 vont ensuite s'écouler par effet tunnel vers le niveau e1 après un temps de relaxation τ_T (voir figure 2a).

Selon l'exemple de réalisation des figures 2a et 2b, la couche 1 est le substrat. Cependant on pourrait inverser la structure. La couche 7 pourrait alors être le substrat et la couche 1 serait la couche de surface.

A titre d'exemple la figure 3 représente un exemple de réalisation à base de matériau épitaxiés contraints ou non tel que GaAs/AlGaAs, ou InP/InGaAs.

Par exemple les couches 1 à 7 sont réalisées dans les matériaux suivants :

- couche 1 = GaAs dopé de type n+
- couche 2 = Al_xGa_{1-x}As
- couche 3 = Al_yGa_{1-y}As dopé de type n+ au centre
- couche 4 = Al_zGa_{1-z}As
- couche 5 = Al_tGa_{1-t}As
- couche 6 = Al_xGa_{1-x}As
- couche 7 = GaAs dopé de type n+

Dans ces formules, les paramètres x, y, z et t sont tels que :

$$0 \leq y \leq t < z < x$$

L'asymétrie de la structure concernant notamment les couches 3 et 5 peut être contrôlée aussi bien par les paramètres y et t (composition en Al) que par l'épaisseur des couches.

La structure est dopée, notamment la couche 3 de telle sorte que, au repos, la majorité des électrons sont localisés dans le puits le plus profond (niveau e1).

La structure est dopée et la majorité des électrons sont localisés dans le puits le plus profond (niveau 1). Lors de l'irradiation ($\hbar\nu = e_2 - e_1$) les

électrons sont excités du niveau e1 au niveau e2 et relaxent soit vers le niveau e1 soit vers le niveau e3 en un temps de l'ordre de 0,2 ps.

Ceux qui sont relaxés sur le niveau e3 vont y rester jusqu'à ce qu'ils transitent par effet tunnel vers le niveau e1.

Ce mécanisme est décrit par les équations suivantes :

$$\frac{dn_2}{dt} = G_{12} + G_{32} - n_2 (1/\tau_{12} + 1/\tau_{23})$$

$$\frac{dn_1}{dt} = - G_{12} + n_2 / \tau_{12} + n_3 / \tau_{12} T$$

$$\frac{dn_3}{dt} = - G_{32} + n_2 / \tau_{23} - n_3 / \tau_{23} T$$

- n1, n2 et n3 sont les populations d'électrons sur les niveaux e1, e2, e3 respectivement ;

- les taux de génération électronique G₁₂ et G₃₂ ont été définis précédemment ;

- τ_{12} est le temps de transit du niveau e1 au niveau e2 ;

- τ_{23} est le temps de transit du niveau e2 au niveau e3 ;

- τ_T est le temps de transit par effet tunnel du niveau e3 au niveau e1.

Pour simplifier le calcul, on suppose que les durées de vie τ_{12} et τ_{32} sont sensiblement égales ($=\tau$) et que seul le niveau e1 est peuplé :

$$n_2 \ll n_1, n_3 \ll n_1, n_1 - N_D$$

(N_D = densité surfacique de dopage de la couche

3)

$$G_{12} \sim B N_D \phi$$

$$G_{32} \sim B n_3 \phi$$

et à l'état stationnaire :

$$n_3 = (B\phi/(B\phi + 2/\tau_T)) N_D = (B\tau_T/2) N_D \phi$$

Si on compare cet état à celui décrit précédemment en relation avec la structure de la figure 1 où on l'a trouvé :

$$n_2 \sim B\tau_T N_D \phi, \text{ on trouve que :}$$

le gain en population est donc de l'ordre de $\tau_T/2\tau$

Or, les temps d'effet tunnel peuvent être contrôlés par l'épaisseur de la barrière isolante ou sa composition, ou même par une polarisation appliquée à la structure. Une optimisation doit être réalisée pour augmenter ce temps tunnel sans nuire aux différentes forces d'oscillateur entre les niveaux et en gardant la différence $e_2 - e_1$ de niveaux d'énergies proche de $\hbar\nu$, (l'énergie de l'onde électromagnétique). Les simulations numériques, dont un exemplaire représenté en figure 4 prévoient des gains de trois ordres de grandeur sur les différents coefficients non linéaires vis-à-vis de ceux de l'art connu.

L'invention prévoit de réaliser une structure for-

mée de puits quantiques asymétriques couplés tels que décrits précédemment et destinée à présenter des caractéristiques d'optiques non linéaires très importantes, en particulier de rectification optique.

La figure 5 représente une disposition des couches pour réaliser un détecteur de type capacitif. Dans cette structure on réalise un empilement de puits de composition asymétrique tels que décrits précédemment de façon à en réaliser un multipuits quantique de composition asymétrique MPQCA.

Le substrat comporte un contact ohmique. La surface supérieure est recouverte d'une couche de contact (GaAs dopé n^+) munie d'électrodes (en or par exemple). Cette surface supérieure est éclairée par un rayonnement $h\nu$ à détecter.

Les transitions optiques ou les excitations thermiques induisent un dipôle mesurable sous forme d'une différence de potentiel aux bornes de l'échantillon qui est détectable par un détecteur connecté aux électrodes.

La figure 6, représente l'intégration d'un dispositif selon l'invention avec un transistor tel qu'un transistor à effet de champ. Sur cette figure, on retrouve référencé par DET, le dispositif de l'invention réalisé sous la forme d'un multi-puits quantique.

Le dispositif DET est réalisé sur un substrat en GaAs fortement dopé de type n. Le substrat dopé n^+ sert de source au transistor à effet de champ.

La figure 6 représente un tel dispositif intégré dans lequel le dispositif de détection DET, constitué d'un empilement de puits quantiques asymétriques, est intégré à la source d'un transistor à effet de champ.

Selon la figure 6, la structure selon l'invention est réalisée à titre d'exemple en arseniure de gallium et comprend :

- sur un substrat GaAs semi-isolant, une couche de GaAs dopé n et comportant deux zones dopées n^+ constituant la source et le drain ;
- une couche métallique constituant la grille du transistor et située entre les deux zones dopées n^+ ;
- le dispositif de détection DET constitué d'un empilement de puits quantiques asymétriques et situé sur la zone dopée n^+ de la source du transistor ;
- une couche d'isolant ISO permettant d'isoler les flancs du dispositif de détection ainsi que des connexions du transistor ;
- une connexion métallique CX1 permettant de connecter la face supérieure de dispositif DET à la grille du transistor ;
- une connexion métallique CXO connectée au drain du transistor et fournissant un signal de sortie.

La face supérieure du dispositif DET possède une fenêtre FE ne comportant ni isolant ni

connexion métallique et permettant à un rayonnement d'agir sur le dispositif DET.

Le rayonnement peut être transmis au dispositif DET par un dispositif de modulation mécanique ou électrooptique tel que cela est représenté sur la figure 6.

Le dispositif DET permet ainsi de créer une différence de potentiel entre la source et la grille. On détecte sur la connexion de drain CXO, un signal de tension de sortie proportionnel à l'intensité de rayonnement fourni au dispositif DET.

La figure 7 représente à titre d'exemple une réalisation chiffrée d'un dispositif selon l'invention. Selon cette invention, le dispositif a été réalisé à base de GaAs sur un substrat de GaAs fortement dopé de type n.

Ce substrat est recouvert d'une couche tampon (BUFFER) de GaAs dopé silicium de 500 nm d'épaisseur puis d'une couche espaceur (SPACER) de GaAs non intentionnellement dopée d'épaisseur 5 nm.

Sur cet ensemble sont réalisées les couches suivantes :

couche 2 = en $Al_xGa_{1-x}As$ d'épaisseur 30 nm, avec $x = 0,42$

couche 3 = en GaAs d'épaisseur 7 nm dopé silicium ($N_D = 4,3 \times 10^{11} cm^{-2}$)

couche 4 = en $Al_zGa_{1-z}As$ d'épaisseur 20 nm, avec $z = 0,21$

couche 5 = en GaAs non intentionnellement dopé d'épaisseur 5 nm

Cet empilement de couches 2 à 5 étant répété 50 fois puis sur l'empilement réalisé on réalise les couches suivantes :

couche 6 = en $Al_xGa_{1-x}As$ d'épaisseur 30 nm, avec $x = 0,42$

couche 7 = constituée d'un espaceur (SPACER) en GaAs non intentionnellement dopé et d'une couche de GaAs dopé silicium d'épaisseurs respectives 5 et 300 nm.

Il est bien évident que la description qui précède a été faite qu'à titre d'exemple non limitatif et que d'autres variantes peuvent être envisagées sans sortir du cadre de l'invention. Les exemples numériques et la nature des matériaux indiqués n'ont été fournis que pour illustrer la description.

Revendications

50

1 - Détecteur capacitif d'onde électromagnétique, caractérisé en ce qu'il comprend :

a) une structure semiconductrice possédant au moins un empilement d'une première, deuxième, troisième, quatrième, cinquième, sixième et septième couches (1, 2, 3, 4, 5, 6 et 7) dont les largeurs des bandes interdites permettent d'obtenir un profil suivant d'énergie potentielle cor-

- respondant au bas de la bande de conduction pour les électrons :
- énergie (V3) la plus basse pour la troisième couche (3) ;
 - énergie intermédiaires (V4 et V5) pour les quatrième et cinquième couche (4 et 5) avec une énergie supérieure pour la quatrième couche (4) par rapport à l'énergie de la cinquième couche (5), la quatrième couche (4) constituant une barrière interne ;
 - énergies de valeurs supérieures (V2, V6) pour les deuxième et sixième couches (2, 6) constituant les barrières du puits ; ladite structure est telle que :
 - l'énergie correspondant à un premier niveau électronique permis (e1) est inférieure à l'énergie potentielle (V4) du bas de la bande de conduction du matériau de la quatrième couche (4),
 - l'énergie correspondant à un deuxième niveau électronique (e2), est comprise entre l'énergie potentielle (V4) du bas de la bande de conduction du matériau de la quatrième couche (4) et les énergies potentielles (V2, V6) du bas de la bande de conduction des matériaux des deuxième et sixième couches (2, 6),
 - l'énergie correspondant à un troisième niveau électronique (e3) est comprise entre l'énergie potentielle (V4) du bas de la bande de conduction du matériau de la quatrième couche (4) et l'énergie potentielle (V5) du bas de la bande de conduction du matériau de la cinquième couche (5), ce troisième niveau électronique (e3) étant supérieur au premier niveau électronique (e1), l'énergie potentielle (V4) du bas de la bande de conduction du matériau de la quatrième couche (4) et l'épaisseur (d4) de cette quatrième couche interdit un couplage électronique fort entre le premier niveau permis (e1) et le troisième niveau (e3) ;
 - b) des moyens de peuplement en électrons du premier niveau électronique permis (e1) ;
 - c) des moyens de détection d'un champ électrique (8, 9) connectés aux première et septième couches (1, 7).
2. Dispositif de détection selon la revendication 1, caractérisé en ce que la différence des niveaux d'énergie des premier et deuxième niveaux (e1, e2) correspond sensiblement à l'énergie des photons à détecter.
3. DéTECTEUR CAPACITIF D'ONDE ELECTROMAGNETIQUE SELON LA REVENDICATION 1, CARACTÉRISÉ EN CE QUE LES LARGEURS D' BANDES INTERDITES DES DEUXIÈME ET SIXIÈME COUCHES (1, 6) SONT SENSIBLEMENT ÉQUIVALENTES.
4. DéTECTEUR CAPACITIF D'ONDE ELECTROMAGNETIQUE SELON LA REVENDICATION 1, CARACTÉRISÉ EN CE QUE LES LARGEURS DE BANDES INTERDITES DES PREMIÈRE ET SEP-

- TIÈME COUCHES (1, 7) SONT SENSIBLEMENT ÉQUIVALENTES.
5. DéTECTEUR D'ONDE ELECTROMAGNETIQUE SELON LA REVENDICATION 1, CARACTÉRISÉ EN CE QUE LA PREMIÈRE OU LA SEPTIÈME COUCHE (1 OU 7) AU MOINS EST DOPÉE DE TYPE N.
6. DéTECTEUR CAPACITIF D'ONDE ELECTROMAGNETIQUE SELON LA REVENDICATION 1, CARACTÉRISÉ EN CE QUE LA TROISIÈME COUCHE (3) EST DOPÉE DE TYPE N.
7. DéTECTEUR CAPACITIF D'ONDE ELECTROMAGNETIQUE SELON LA REVENDICATION 1, CARACTÉRISÉ EN CE QU'IL COMPORE AU MOINS UN PREMIER EMPILEMENT DE COUCHES (PQ1) COMPORTANT AU MOINS LA DEUXIÈME, TROISIÈME, QUATRIÈME, CINQUIÈME COUCHES (2 À 5) DISPOSÉ SUR LA PREMIÈRE COUCHE ET, DISPOSÉ SUR LE PREMIER EMPILEMENT, UNE SUCCESION D'EMPILEMENTS DE COUCHES (PQ2 À PQn) COMPORTANT CHACUN DES COUCHES IDENTIQUES AU PREMIER TYPE D'EMPILEMENT (PQ1) PUIS UNE SIXIÈME COUCHE BARRIÈRE (6) ET UNE SEPTIÈME COUCHE DE CONTACT (7).
8. DéTECTEUR D'ONDE ELECTROMAGNETIQUE SELON LA REVENDICATION 1, CARACTÉRISÉ EN CE QUE LES MOYENS DE DÉTECTION D'UN CHAMP ÉLECTRIQUE COMPORE DES ELECTRODES (8, 9) EN CONTACT AVEC LES SURFACES EXTÉRIEURES DES PREMIÈRE ET SEPTIÈME COUCHES (1, 7).
9. DISPOSITIF DE DÉTECTION SELON LA REVENDICATION 7, CARACTÉRISÉ EN CE QU'IL COMPORE UN TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP ET QU'UN EMPILEMENT DE PLUSIEURS PUITS QUANTIQUES EST INTÉGRÉ AU DRAIN OU À LA GRILLE DU TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP DE FAÇON À CE QU'UNE TENSION CRÉÉE ENTRE LES DEUX COUCHES EXTRÉMES DE L'EMPILEMENT DE PUITS QUANTIQUES PERMET DE COMMANDER LE TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP.
- 35
- 40
- 45
- 50
- 55

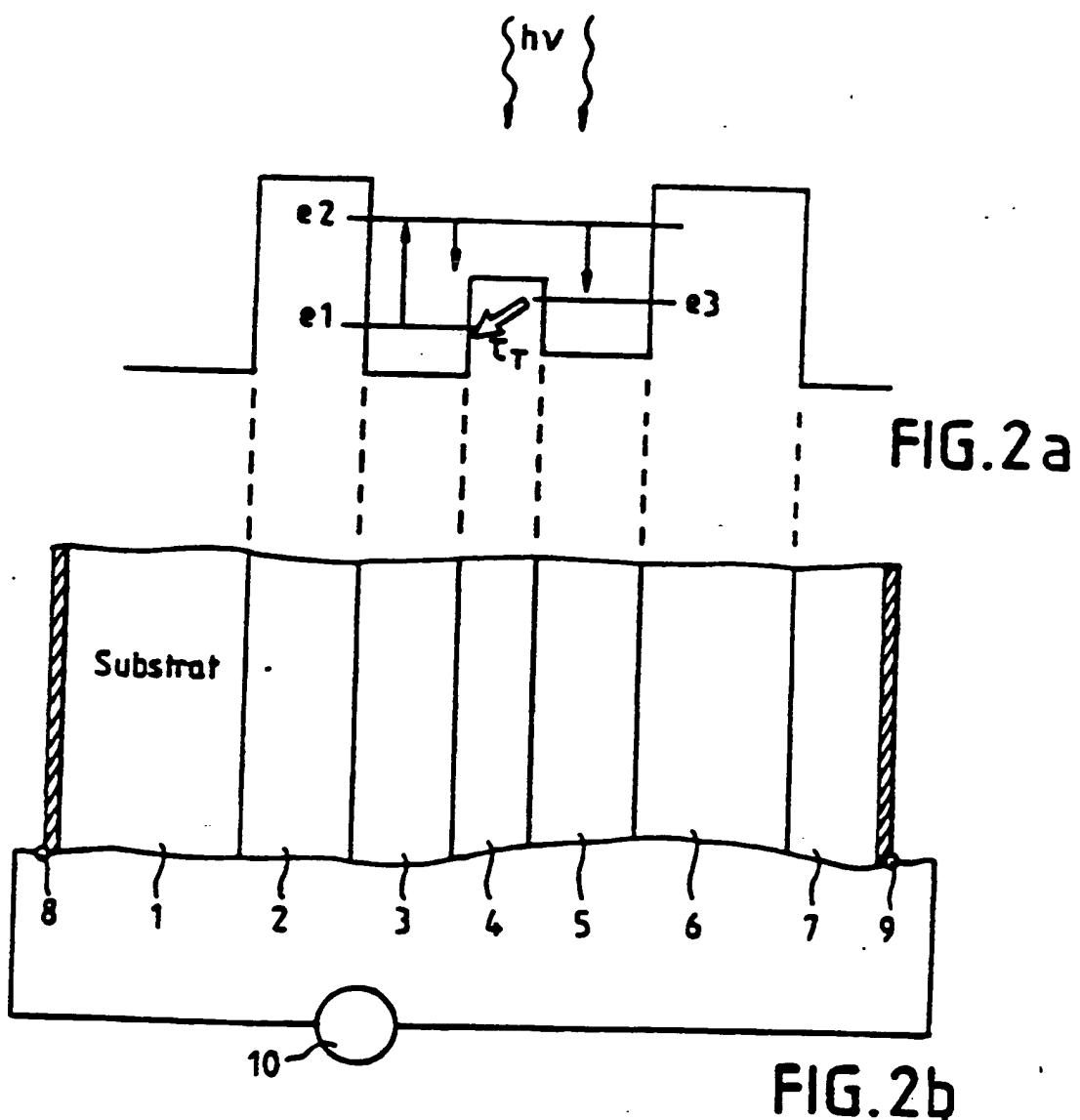
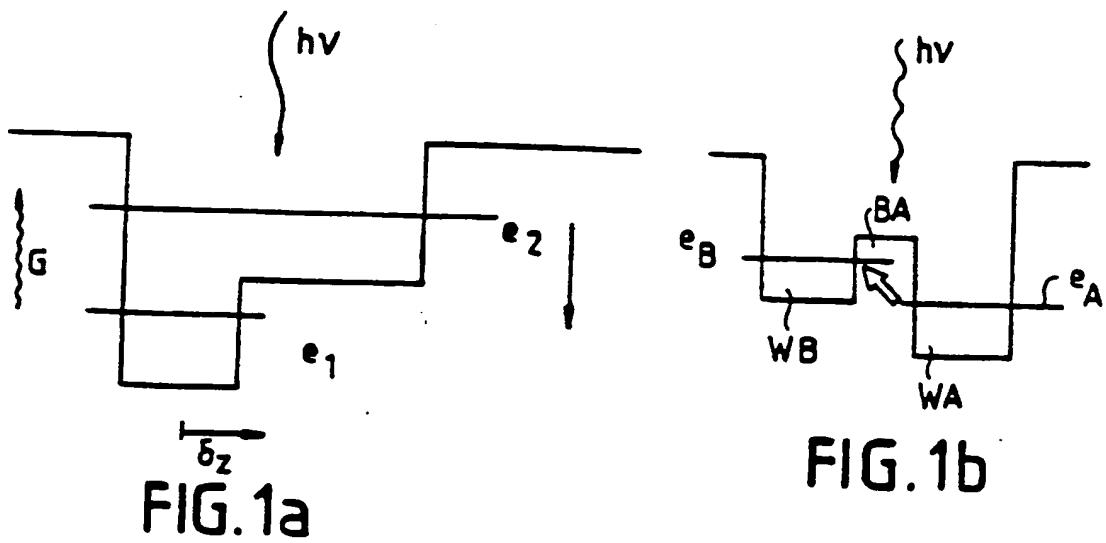


FIG. 3

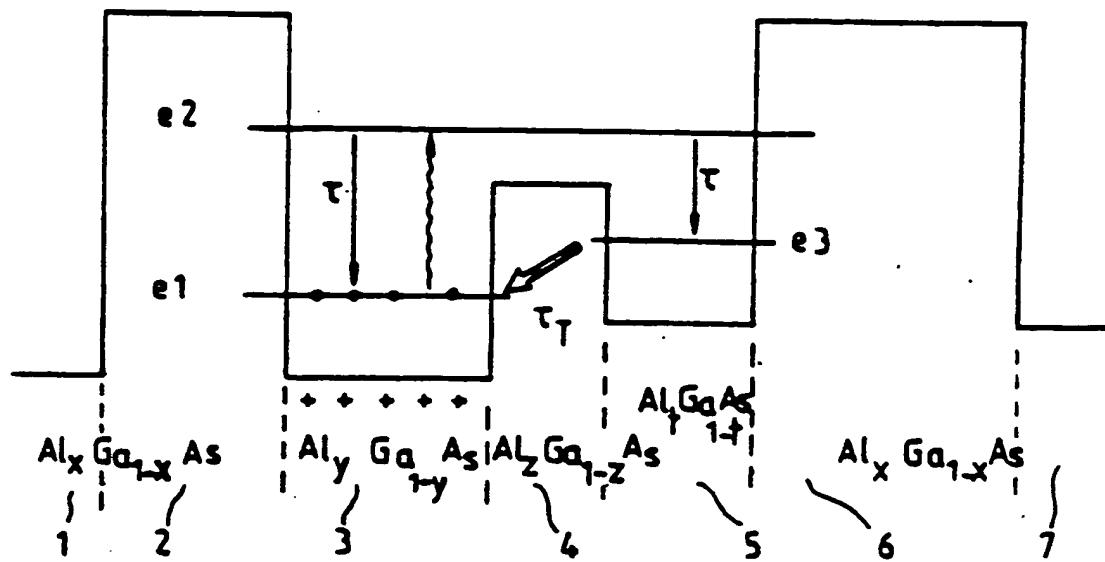
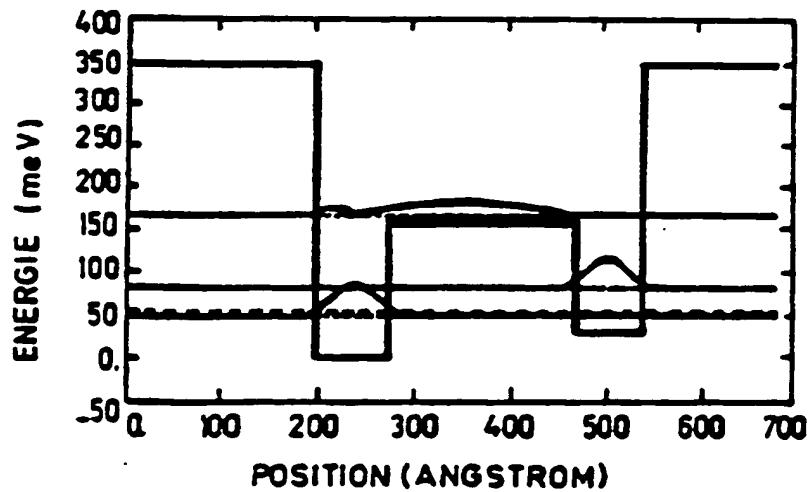


FIG. 4



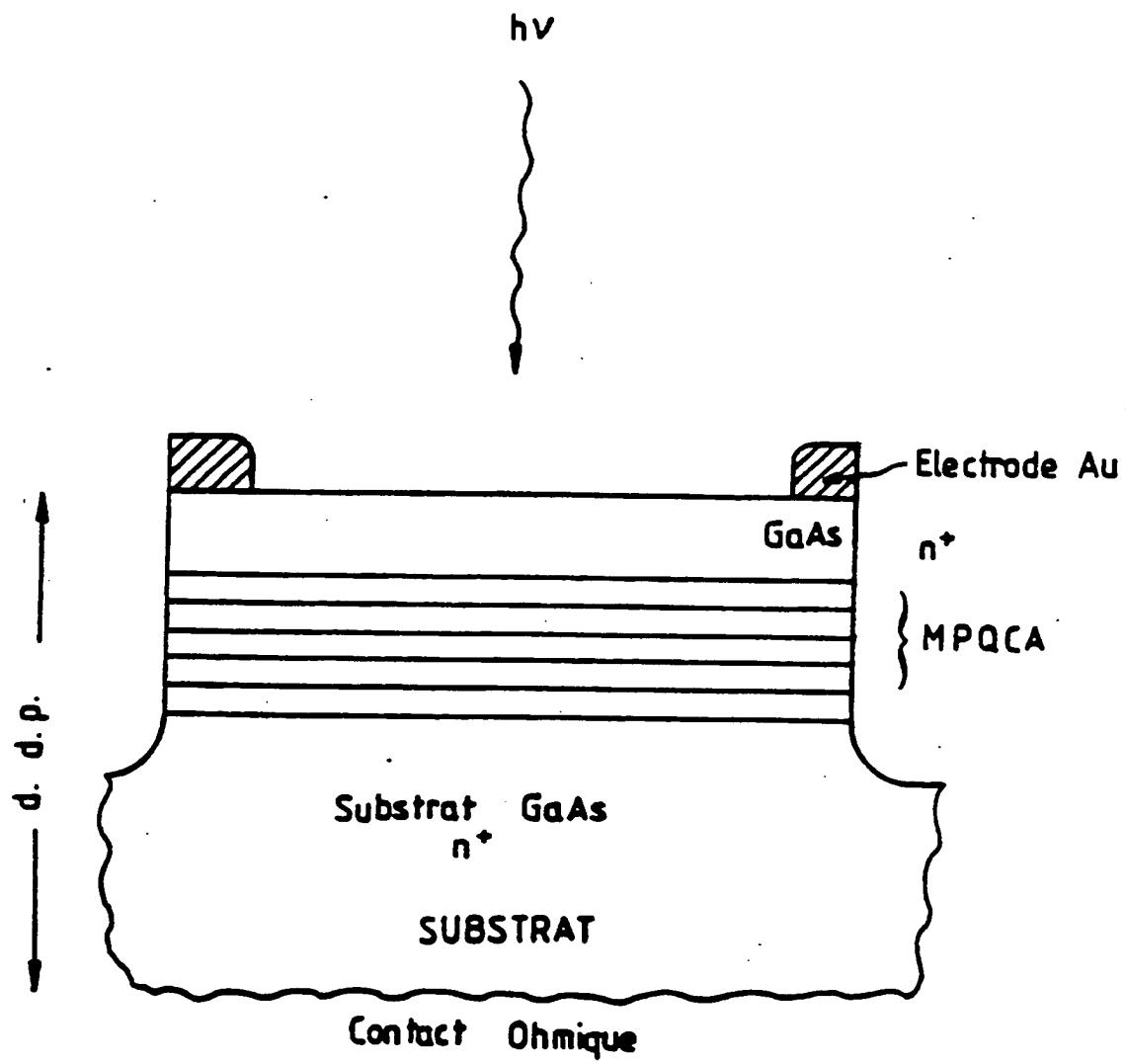


FIG.5

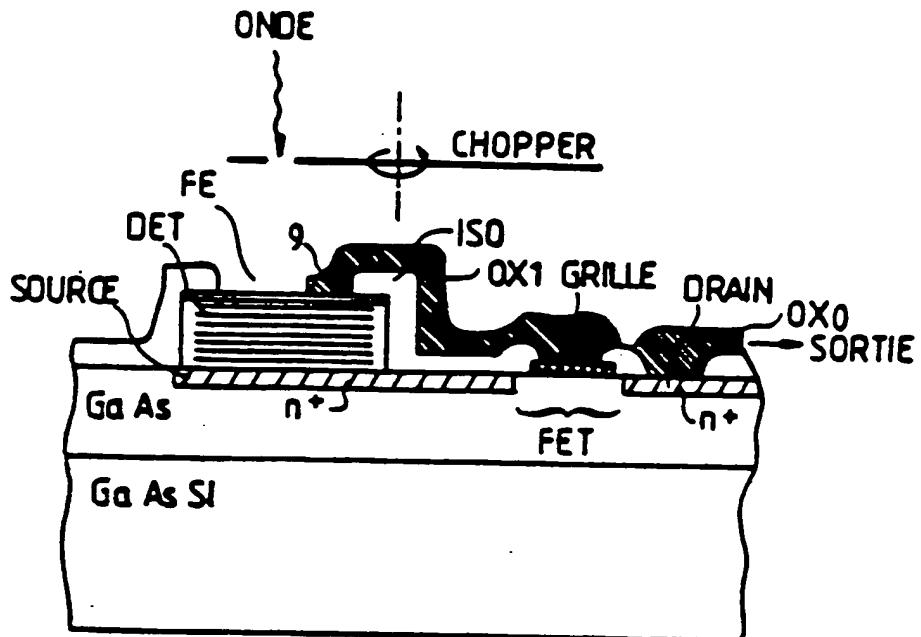


FIG. 6

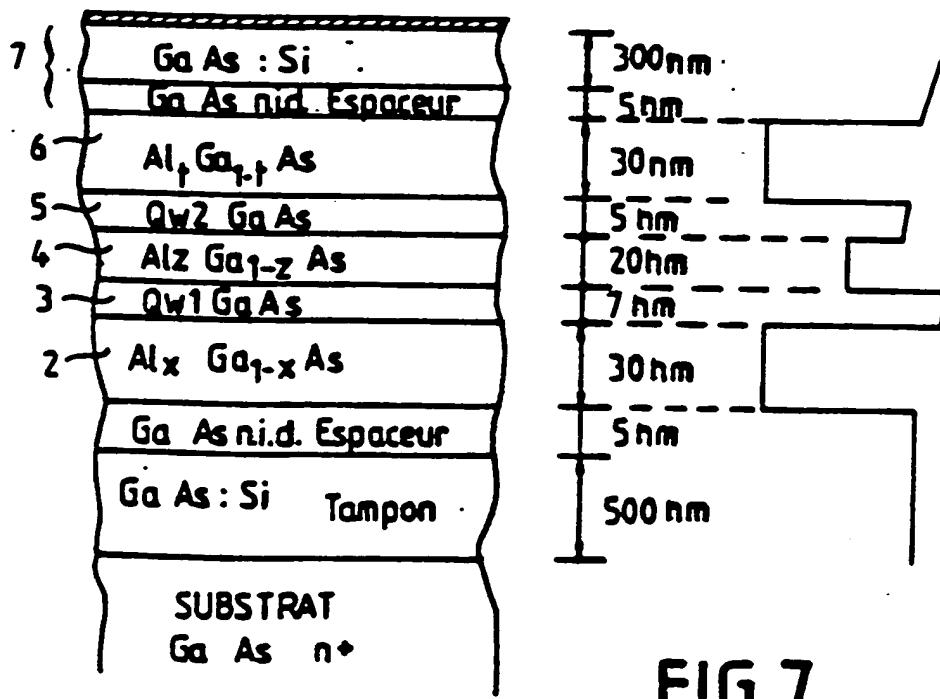


FIG. 7